6Д

УДК 519.87

И.В. Дорохов
Государственный университет информатики и искусственного интеллекта,
г. Донецк, Украина
dla_friendov@rambler.ru

Разработка математической модели системы поиска людей под завалами на основе эффекта Доплера

В статье рассматривается проблема математического моделирования основных процессов, возникающих при поиске биологических объектов под завалами при помощи радиоволновых методов. Предлагается модель, позволяющая вычислять основные численные параметры доплеровских процессов для сердцебиения человека.

Введение

Бесконтактное определение таких признаков жизни, как дыхание и сердцебиение, при помощи микроволновых радаров является приоритетной областью при проведении спасательных операций. Микроволновые сигналы способны определять признаки жизни человека, даже находящегося под обломками или снегом. Проблема поиска осложнена тем, что в реальных условиях возникают нетривиальные задачи. Например, щебневые завалы хорошо поглощают радиосигнал, а металлические решетки некоторых обломков вообще могут его не пропускать. И, несмотря на многочисленные успешные примеры применения эффекта Доплера для поиска биологических объектов, прогрессу все равно необходимо решить задачи, связанные с эксплуатацией доплеровских методов в реальных условиях. Суть данных методов заключается в том, что в зависимости от того, удаляется объект от источника излучения или приближается к нему, меняется длина волны и ее частота. Если в качестве объектов взять движения человека и его внутренних органов, вычислить основные характеристики их перемещения в пространстве, то можно определять наличие человека даже за непрозрачными препятствиями. Первая проблема тут заключается в случайных движениях тела и статических помехах, которые могут существенно повлиять на точность обнаружения человека и произвести ложные срабатывания. Для ее решения увеличивается число датчиков системы поиска. Вторая проблема заключается в утечке и размытии синусоидальной компоненты при оценивании частоты на основе быстрого преобразования Фурье.

Целью данной работы является разработка математической модели взаимодействия микроволн с работающим сердцем на основе эффекта Доплера для исследования основных процессов, объектов и их свойств, возникающих при поиске людей под завалами.

Модель работы системы обнаружения сердцебиения

Даже когда человек находится в бессознательном состоянии, его внутренние органы находятся в постоянном колебательном движении. Когда непрерывная электромагнитная волна попадает на движущийся объект (например, на бьющееся сердце или

на перемещающуюся грудную клетку), то на отраженный сигнал накладывается сдвиг Доплера. При этом у отраженной волны изменяется длина и частота колебаний [1].

Формула, описывающая эффект Доплера, представляет собой математическое выражение векторного сложения двух скоростей – *v* и *c*. На рис. 1 представлен процесс распространения волн при движущемся источнике колебаний *i.* Пока волновой фронт, испущенный из точки 0, дойдет до точки *A*, источник колебаний *i* окажется в точке *B* [2].

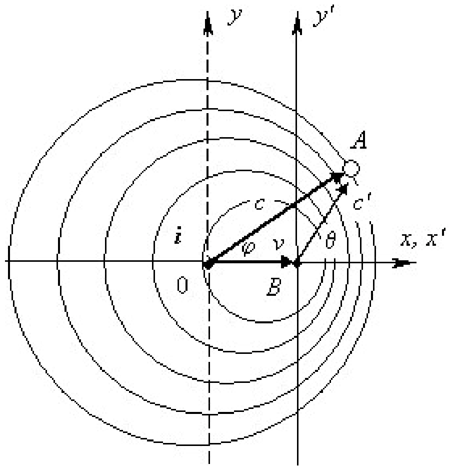


Рисунок 1 – Процесс распространения волн при движущемся источнике колебаний

На рис. 1 изображен динамический процесс распространения волн в фиксированный момент времени. Поскольку все треугольники *0AB* будут подобными, то на одной из окружностей выбрана точка *A*. Стороны треугольника *0A* и *0B* соответствуют скоростям *v* и *c*; нужно по двум сторонам треугольника *0AB* найти третью – *AB*. Для решения этой задачи треугольник *0AB* нужно достроить до прямоугольного *0AC*, как показано на рис. 2.

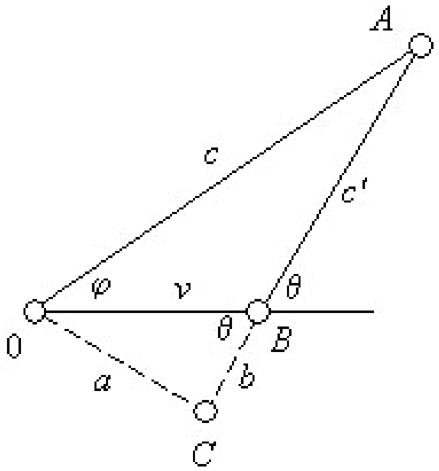


Рисунок 2 – Вспомогательный прямоугольный треугольник

По правилам геометрии можно найти отрезки $a = v\, sin(\theta)$ и $b = v\, cos(\theta)$ и составить равенство:

$$c' + b = \sqrt{c^2 - a^2}. \quad (1)$$

Если в последнее выражение подставить значения *a* и *b*, получим искомую скорость *c',* представляющую собой вектор скорости после смещения источника *i* в точку *B* [3]:

$$c' = \sqrt{c^2 - v^2 sin^2\theta} - vcos\theta. \quad (2)$$

Умножив обе части равенства (2) на период колебаний *T*, получим изменившуюся за счет эффекта Доплера длину волны λ', которую удобно выразить через параметр β:

$$\lambda' = \lambda'(\sqrt{1-\beta^2 sin^2\theta} - \beta cos\theta). \qquad (3)$$

Формула (3) является выражением, описывающим эффект Доплера для любых значений параметра β.

Упрощенная математическая модель работы человеческого сердца

При зондировании человеческого тела электромагнитные волны сильнее всего отражаются от границы раздела сред: воздух – грудная клетка, грудная клетка – легкие, ткань тела – кровь, а особенно от сердца и крупных сосудов [1]. Однако дыхание человека менее равномерно и ритмично, чем работа сердца. Поэтому отраженные сигналы от сердечной мышцы имеют более характерные признаки, что позволяет выделять их на основе других сигналов и шумов.

При работе основные движения совершает не вся сердечная мышца. На рис. 3 показана область, совершающая основные колебания.

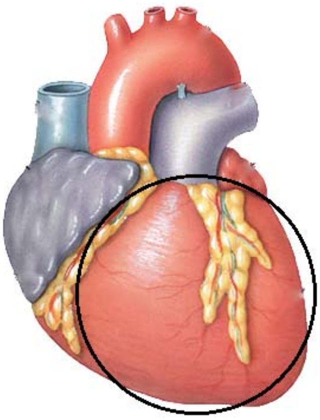


Рисунок 3 – Подвижная область сердца

Для упрощения моделирования представим, что подвижная часть сердца человека представляет собой окружность. Условно работу сердца можно разделить на две фазы. Первая фаза наступает, когда сердце расширяется и заполняется кровью. Обозначим ее через переменную V_{max}. После этого сердечная мышца сжимается и выталкивает поступившую в него кровь через клапаны. Обозначим эту фазу через переменную V_{min}. Одно расширение, а затем одно сужение сердца в медицине называется ударом сердца. Один удар происходит за один полный период времени T, после чего сердце возвратится в прежнее положение и цикл будет повторяться вновь. Исходя из перечисленного, можно сделать вывод, что работа сердца представляет собой гармонический колебательный процесс с периодичностью T.

При работе сердца человека есть три основных положения – экстремумы функции, т.е. его минимальный и максимальный объем, и положение сердца, от которого откладываются построения – средняя линия. Максимальную амплитуду изменения объема сердца обозначим как V_a.

Основные параметры работы сердца можно взять из медицинских справочников. Частота сердечных сокращений ω обычно изменяется от 0,8 Гц до 2,5 Гц [4]. Сред-

ний объем сердца у обычного человека равен приблизительно 500 см3. Обозначим его как $V_{min} + V_a$. В среднем амплитуда A человеческого сердца составляет 1 см.

Основной задачей при построении модели работы сердца является нахождение параметра, отражающего, насколько приблизилась или отдалилась стенка сердечной мышцы к источнику микроволновых сигналов. Для этого нужно знать объем сердца в определенный момент времени и сравнивать, на какое расстояние l перемещается внешняя стенка сердца по направлению к источнику или от него.

Исходя из вышеописанного, получим формулу для вычисления объема сердца V в определенный момент времени t:

$$V = (V_{min} + V_a) + V_a \cdot \cos\left(\frac{\omega}{2 \cdot \pi} t\right), \quad (4)$$

где V_a – максимальная амплитуда изменения объёма сердца, описываемая выражением:

$$V_a = \frac{V_{max} - V_{min}}{2}. \quad (5)$$

Чтобы рассчитать расстояние l в данный момент времени исходя из объема, нужно получить значение радиуса среднестатистического сердца в средней линии.

Преобразовав геометрическую формулу нахождения объема [1], получим формулу для нахождения радиуса:

$$R = \sqrt[3]{\frac{V}{\frac{4}{3}\pi}}. \quad (6)$$

Радиус сердца R с определенным объемом в заданный промежуток времени, как и радиус средней линии сердца, будет находиться по формуле (6). Отсюда расстояние l будет определяться выражением:

$$l = R - R_{ср}. \quad (7)$$

Если получено отрицательное значение l, значит, сердце сужается и выталкивает кровь, если получено положительное значение, значит, сердце расширяется и пропускает внутрь себя кровь.

Если уравнение $A - |l| = 0$ верно, то сердце находится в одном из своих экстремумов.

На рис. 4 приведен график синусоидального движения сердечной мышцы.

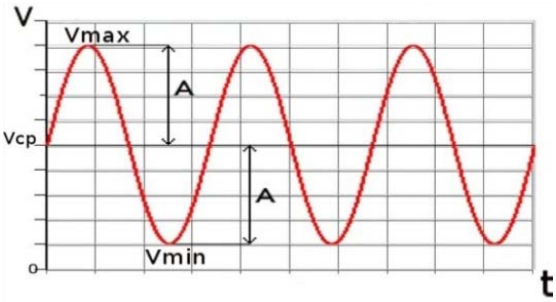


Рисунок 4 – График движения сердца

Из рисунка видно, что сердечная мышца сужается и расширяется по закону гармонических колебаний. Изменяя параметры модели, можно вычислять параметры работы сердца при различных состояниях.

Выводы

Обнаружение признаков жизни при помощи микроволнового излучения может быть полезным при проведении спасательных операций. В данной статье была разработана математическая модель работы сердца человека и рассмотрена модель на основе эффекта Доплера. Данные модели позволяют получать характеристики рассматриваемого реального объекта и присущие ему процессы. К недостаткам модели можно отнести упрощения при моделировании работы сердца, в частности модель не учитывает эффект «дрожания» [5] сердца при тяжелом состоянии пострадавшего.

Литература

1. Джанколи Д. Физика : в 2 т. Т. 1 / Джанколи Д. ; пер. с англ. – М. : Мир, 1995. – 656 с.
2. Droitcour A.D. Performance Benefits in Single-Chips Silicon Doppler Radars for Noncontact Cardiopulmonary Monitoring / A.D. Droitcour, O. Boris-Lubecke, V.M. Lubecke // IEEE Trans. Microwave Theory Tech. – 2004. – № 52. – P. 838-848.
3. Иммореев И. СВЧ радары: возможности, проблемы, будущее / И. Иммореев. – М. : МНТУ, 1998. – Т. 4.
4. Рис У.Г. Основы дистанционного зондирования / У.Г. Рис. – М. : Техносфера, 2006. – 336 с., ил.
5. Li C. A 5 GHz double-sideband radar sensor chip in 0.18μm CMOS for noncontact vital signs detection / Li C., Xiao Y., Lin J. // IEEE Microwave Compon. Lett. – 2008. – № 18. – P. 494-496.

І.В. Дорохов
Розробка математичної моделі системи пошуку людей під завалами на основі ефекту Доплера
У статті розглядається проблема математичного моделювання основних процесів, що виникають при пошуку біологічних об’єктів під завалами за допомогою радіохвильових методів. Пропонується модель, що дозволяє обчислювати основні числові параметри доплерівських процесів для серцебиття людини.

I.V. Dorokhov
Development of the Mathematical Model of the System of People Searching under the Rubble on the Basis of Doppler’s Effect
The problem of mathematical modeling of basic processes which arise when searching biological objects under rubble using radiowave techniques are considered. A model which allows to calculate basic numerical parameters of Doppler processes for the heart of man is proposed.

Статья поступила в редакцию 11.06.2010.